温度上昇とともに増えるスタティック電流に注目

90nm/65nm プロセス時代の熱設計

長嶋佐恭

LSIの製造技術が90nmプロセス時代になって以来，主にスタティック電流の増大に起因する消費電力と熱対策が問題となっている．本誌でも，2006年9月号と10月号の特集1で，"ロー・パワー・デザイン特別企画"として，FPGAの熱対策とLSIの低消費電力設計技術を取り上げた．本稿では，微細プロセス技術で製造されるLSIの消費電力についてさらなる考察を行う．温度上昇とともに増えるスタティック電流に注目する．（編集部）

最近，LSIの電力管理に関する関心がとみに高まっています．LSIの製造技術が90nmプロセスになってから，従来の考え方とは異なる設計が必要になっているためです．

スタティック電流（リーク電流）は，温度が上昇すると指数関数的に増加する特性を持ちます．このため，スタティック電力の電力消費全体に占める割合が大きくなっています．指数関数の特性を持つため温度ドリフトが伴い，それを考慮して使えるダイナミック電流を求めなければなりません．また，ドリフトに正帰還が掛かって熱暴走に至るポイントがあることも考慮に入れる必要があります．

本稿では，スタティック電流が指数関数的な特性を持つLSIの熱設計の一考察を試みます．

1 指数関数的特性における熱設計の基本

ある想定した指数関数の特性を示す，ジャンクション温度対スタティック電流を**図1**に示します．

まず，**図1**におけるA点を出発点とするドリフトを考察します．A点におけるジャンクション温度をT_{j1}とし，その時のスタティック電流をI_{s1}とします．このI_{s1}による電流がもたらす電力消費の結果生じるジャンクション温度をT_{j2}とします．ジャンクション温度がT_{j2}のときのスタティック電流をI_{s2}とします．I_{s2}による電流がもたらす電力消費の結果生じるジャンクション温度をT_{j3}とします．

T_{j2}，T_{j3}はそれぞれ次のような式で表されます．I_dはダイナミック電流，θは熱抵抗を表します．

$$T_{j2} = \left(I_d + I_{s1}\right) \cdot V_{cc} \cdot \theta + T_a \quad \cdots\cdots(1)$$

$$T_{j3} = \left(I_d + I_{s2}\right) \cdot V_{cc} \cdot \theta + T_a \quad \cdots\cdots(2)$$

$$\begin{aligned} T_{j3} - T_{j2} &= \left(\left(I_d + I_{s2}\right) \cdot V_{cc} \cdot \theta + T_a\right) \\ &\quad - \left(\left(I_d + I_{s1}\right) \cdot V_{cc} \cdot \theta + T_a\right) \\ &= \left(I_{s2} - I_{s1}\right) \cdot V_{cc} \cdot \theta \quad \cdots\cdots(3) \end{aligned}$$

ここでA点とB点のジャンクション温度の上昇の大きさを比較してみます．B点における上昇がA点における上昇より大きくなる場合，熱暴走の領域に入っていることを意味します．

式で表すと，次式になります．

$$\frac{T_{j3} - T_{j2}}{T_{j2} - T_{j1}} > 1 \quad \cdots\cdots(4)$$

式(4)に式(3)を代入すると式(5)が導かれます．

熱暴走の条件はスタティック電流特性と電源電圧V_{cc}，熱抵抗に依存して決まることが分かります．

KeyWord　90nmプロセス，スタティック電流，消費電力，リーク電流，ダイナミック電流，温度ドリフト，ジャンクション温度，熱暴走

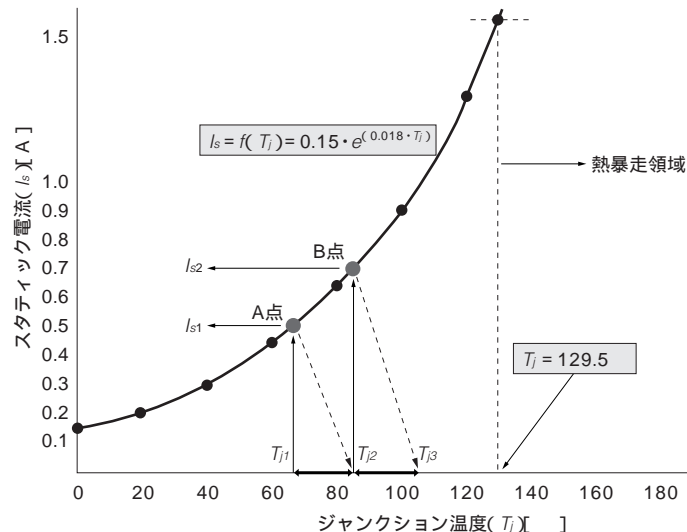



図1
ジャンクション温度対スタティック電流

A点におけるジャンクション温度を T_{j1} とし，その時のスタティック電流を I_{s1} とする．この I_{s1} による電流がもたらす電力消費の結果，生じるジャンクション温度が T_{j1} である．

$$\frac{\left(I_{s2} - I_{s1}\right) \cdot V_{cc} \cdot \theta}{T_{j2} - T_{j1}} > 1$$

$$\frac{I_{s2} - I_{s1}}{T_{j2} + T_{j1}} > \frac{1}{V_{cc} \cdot \theta} \quad \cdots\cdots(5)$$

式(5)の左辺は，指数関数グラフの傾きを意味しています．**図1**で想定した特性は，式(6)で表されます．

$$I_s = f\left(T_j\right) = 0.15 \cdot e^{\left(0.018 \cdot T_j\right)} \quad \cdots\cdots(6)$$

傾きを求めるために式(6)を微分すると式(7)になります．

$$I'_s = f'\left(T_j\right) = 0.018 \cdot 0.15 \cdot e^{\left(0.018 \cdot T_j\right)} = 0.0027 \cdot e^{\left(0.018 \cdot T_j\right)} \quad \cdots\cdots(7)$$

従って，**図1**の特性を式(5)に適用すると式(8)に書き換えることができます．

$$0.0027 \cdot e^{\left(0.018 \cdot T_j\right)} \frac{1}{V_{cc} \cdot \theta} \quad \cdots\cdots(8)$$

例として，熱抵抗 θ を30にして熱暴走が始まるジャンクション温度を求めてみます．

式(8)に $V_{cc} = 1.2$ [V]，$\theta = 30$ を代入し計算すると，$T_j =$ 129.5 [℃] になります．

2 許容できるダイナミック電流（動作電流）

ダイナミック電流(I_d)を求めるためにはジャンクション温度の上限値を決める必要があります．

通常，ジャンクション温度の上限値はACタイミングの仕様を保証する温度が定められています．多くの場合，民生用では85℃，工業用では100℃が T_j（最大）になっています．ジャンクション温度は電源電圧，熱抵抗，消費電流，および周囲温度から求まります．

ジャンクション温度，T_j は式(9)で表すことができます．

$$T_j = \left(I_d + f\left(T_j\right)\right) \cdot V_{cc} \cdot \theta + T_a \quad \cdots\cdots(9)$$

ここで，T_a は周囲温度．

式(10)は，式(9)から I_d を求めるために書き直した式になります．

$$I_d = \frac{T_j - T_a}{V_{cc} \cdot \theta} - f\left(T_j\right) \quad \cdots\cdots(10)$$

式(10)を基に周囲温度(T_a)に対する許容できるダイナミック電流(I_d)をプロットして描いたものを，**図2**に示します．電源電圧 V_{cc} は1.2 [V]，熱抵抗 θ をパラメータとして20と30の値をプロットしました．

熱抵抗 θ が30の場合，この図から，このスタティック電流特性のデバイスにおいては，周囲温度70℃以上では使えないことが分かります．よく民生機器の使用周囲温度とされる50℃でも，わずか0.45Aしか動作電流として許容できません．

このように，スタティック電流が指数関数的な特性を持つ場合には，その特性は熱設計において非常に重要な役割を果たします．また，当然のことながら熱抵抗の影響も大

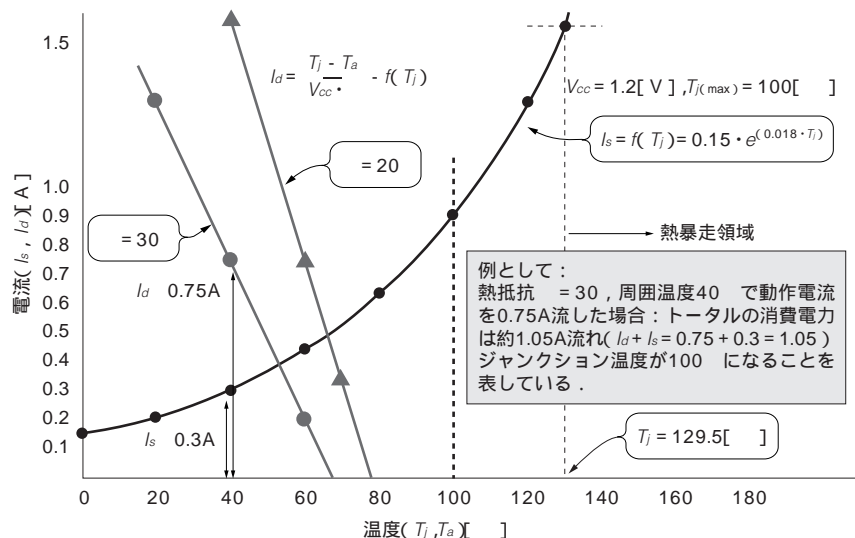



図2
周囲温度と許容できるダイナミック電流の関係
電源電圧 V_{cc} は3.3 [V]，熱抵抗 θ をパラメータとして20と30の値をプロットしたもの．

G2 =0.15*EXP(0.018*B2)

	A	B	C	D	E	F	G
1		Tj	Id	Vcc	θ	Ta	Is
2	Initial	40.00000	0	1.2	30	40	0.308164982
3	1	51.09394	0	1.2	30	40	0.376277236
4	2	53.54598	0	1.2	30	40	0.393256843
5	3	54.15725	0	1.2	30	40	0.397607655
6	4	54.31388	0	1.2	30	40	0.398730223
7	5	54.35429	0	1.2	30	40	0.399020374
8	6	54.36473	0	1.2	30	40	0.399095404
9	7	54.36743	0	1.2	30	40	0.399114808
10	8	54.36813	0	1.2	30	40	0.399119827
11	9	54.36831	0	1.2	30	40	0.399121125
12	10	54.36836	0	1.2	30	40	0.399121461
13	11	54.36837	0	1.2	30	40	0.399121547
14	12	54.36838	0	1.2	30	40	0.399121570
15	13	54.36838	0	1.2	30	40	0.399121576
16	14	54.36838	0	1.2	30	40	0.399121577
17	15	54.36838	0	1.2	30	40	0.399121578
18	16	54.36838	0	1.2	30	40	0.399121578
19	17	54.36838	0	1.2	30	40	0.399121578
20	18	54.36838	0	1.2	30	40	0.399121578
21	19	54.36838	0	1.2	30	40	0.399121578
22	20	54.36838	0	1.2	30	40	0.399121578
23	21	54.36838	0	1.2	30	40	0.399121578
24	22	54.36838	0	1.2	30	40	0.399121578
25	23	54.36838	0	1.2	30	40	0.399121578
26	24	54.36838	0	1.2	30	40	0.399121578
27	25	54.36838	0	1.2	30	40	0.399121578
28	26	54.36838	0	1.2	30	40	0.399121578
29	27	54.36838	0	1.2	30	40	0.399121578
30	28	54.36838	0	1.2	30	40	0.399121578
31	29	54.36838	0	1.2	30	40	0.399121578
32	30	54.36838	0	1.2	30	40	0.399121578
33	31	54.36838	0	1.2	30	40	0.399121578
34							

図3
表計算ソフトウェアによるドリフト安定スタティック電流とジャンクション温度の計算
セルG2に式(6)を立て Is を計算する．最初の T_j，セルB2にはスタート時点であるため T_a と同じ値を入れる．T_j のセルB3以降は式(9)を立て，I_s はその直前のセルGの値を代入して計算する．

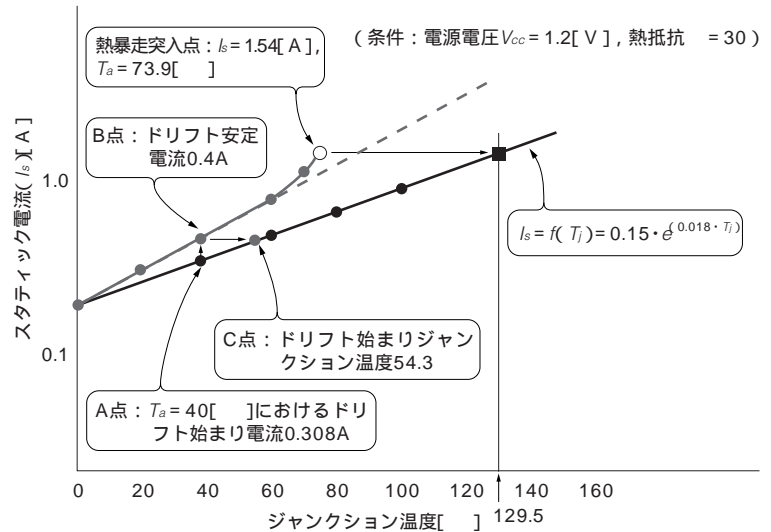
きく，正確な値が求められます．

3 ドリフトによるジャンクション温度の上昇

式(9)からも明らかなように，T_j は T_j 自身の値に依存しています．再帰代入の展開で値が求まりドリフトによる上昇を伴うことが理解できます．

再帰代入の展開はソフトウェアによる求め方もできますが，ここでは簡単に表計算ソフトウェアExcelの関数を使って求めてみました．

図3は計算を行ったシートです．このシートの中で，セルG2に式(6)を立て I_s を計算します．最初の T_j，セルB2にはスタート時点なので T_a と同じ値を入れます．T_j のセルB3以降は式(9)を立て，I_s はその直前のセルGの値を代入して計算します．このようにして計算を繰り返して，T_j と I_s が変化しなくなった点をプロットしたものが**図4**です．

図4
ドリフト安定スタティック電流とジャンクション温度
T_jとI_sが変化しなくなった点をプロットしたもの．

G2 　 =0.15*EXP(0.018*B2)

	A	B	C	D	E	F	G
1		Tj	Id	Vcc	θ	Ta	Is
2	Initial	75.0000	0	1.2	30	75	0.578613830
3	1	95.8301	0	1.2	30	75	0.841829126
4	2	105.3058	0	1.2	30	75	0.998386592
5	3	110.9419	0	1.2	30	75	1.104988057
6	4	114.7796	0	1.2	30	75	1.184016268
7	5	117.6246	0	1.2	30	75	1.246229455
8	6	119.8643	0	1.2	30	75	1.297496582
9	7	121.7099	0	1.2	30	75	1.341324824
10	8	123.2877	0	1.2	30	75	1.379965503
11	9	124.6788	0	1.2	30	75	1.414954905
12	10	125.9384	0	1.2	30	75	1.447402822
13	11	127.1065	0	1.2	30	75	1.478158482
14	12	128.2137	0	1.2	30	75	1.507913205
15	13	129.2849	0	1.2	30	75	1.537269471
16	14	130.3417	0	1.2	30	75	1.566792651
17	15	131.4045	0	1.2	30	75	1.597055550
18	16	132.4940	0	1.2	30	75	1.628683487
19	17	133.6326	0	1.2	30	75	1.662407603
20	18	134.8467	0	1.2	30	75	1.699136433
21	19	136.1689	0	1.2	30	75	1.740061442
22	20	137.6422	0	1.2	30	75	1.786824156
23	21	139.3257	0	1.2	30	75	1.841797631
24	22	141.3047	0	1.2	30	75	1.908590249
25	23	143.7092	0	1.2	30	75	1.993010872
26	24	146.7484	0	1.2	30	75	2.105074925
27	25	150.7827	0	1.2	30	75	2.263627390
28	26	156.4906	0	1.2	30	75	2.508564215
29	27	165.3083	0	1.2	30	75	2.940058934
30	28	180.8421	0	1.2	30	75	3.888557259
31	29	214.9881	0	1.2	30	75	7.189812684
32	30	333.8333	0	1.2	30	75	61.061321787
33	31	2273.2076	0	1.2	30	75	8.83972E+16
34							

図5
表計算ソフトウェアによる熱暴走に至るドリフトの計算
T_aを77 ℃にして計算したもの．

図3はT_aを40 ℃にした場合の結果です．V_{cc}と熱抵抗およびダイナミック電流は固定で，それぞれV_{cc}＝1.2［V］，θ＝30，I_d＝0　として計算しています．T_aを40 ℃にした場合のドリフトのようすを**図4**に示します．スタート時点のI_sは0.308Aです．ドリフトでI_sが上昇して0.4Aで安定します．その結果，I_sが0.4Aの時のジャンクション温度は54.3 ℃になり安定します．

T_aが約74 ℃の時，T_jが129.5 ℃になり熱暴走の領域に入るので，それより高いT_aでは安定点がなくなります．

図5は，T_aを75 ℃にして計算したものです．熱暴走に入るようすが図からも分かります．これをグラフにしたものが**図6**です．図中横軸は時間の経過に対応しますが，どのくらいの時間が経過した後に急しゅんな電流の上昇領域に入るかは，状況により大きく異なります．場合によっては30分以上経過後にデバイスの不良に至る場合もあります．ここでは短時間の放置で異常がなくても熱暴走の危険がな

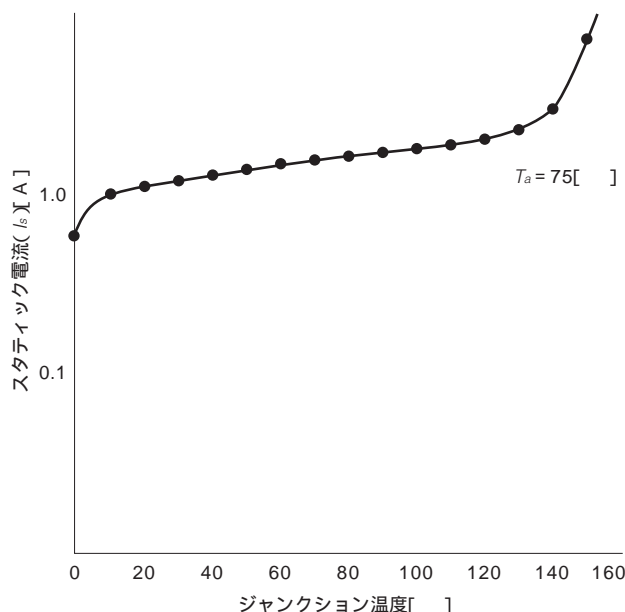



図6　熱暴走に至るドリフトの例
T_aを77℃にして計算したものをグラフ表示．

いとは言い切れないことに注意が必要です．

4　スタティック電流特性の求め方

これまで考察してきたように，スタティック電流が指数関数的に上昇するデバイスにおいては，ただ単にスタティック電流の最大値のみを考慮した熱設計では安全を確認できない可能性があります．

デバイス・メーカにワースト・ケースで正確なスタティック電流特性と熱抵抗の提供を依頼し，熱設計の検証を行うとよいと思います．

スタティック電流の特性をラフな形で実測データから求めることもできます．スタティック電流の式(6)を未知数を使って表すと式(11)になります．

$$I_s = a \cdot e^{(b \cdot T_j)} \quad \cdots\cdots(11)$$

I_sは簡単に測定できますが，T_jの値をどうやって求めるかが問題になります．いずれにしろ正確な値は得られませんが，ラフな値は次の二つの方法が考えられます．

(1) 熱抵抗が信頼できる場合：ある周囲温度にデバイスを置き，スタティック電流のみで動作させスタティック電流が安定して変化しなくなった値からジャンクション温度を計算して求める．

(2) ある周囲温度にデバイスを置き，電源ON直後のスタティック電流を測定する．このとき，当然ながらジャンクション温度は若干上昇しているはずなので，周囲温度に10℃位加えた温度をジャンクション温度としてみる．

未知数が二つなので2ヵ所の周囲温度でI_sとT_jを求める．2点の値をI_{s1}，T_{j1}およびI_{s2}，T_{j2}とすると式(12)と式(13)になります．

$$I_{s1} = a \cdot e^{(b \cdot T_{j1})} \quad \cdots\cdots(12)$$

$$I_{s2} = a \cdot e^{(b \cdot T_{j2})} \quad \cdots\cdots(13)$$

bについて式を展開すると(14)になります．

$$b = \frac{1}{T_{j2} - T_{j1}} \ln \frac{I_{s2}}{I_{s1}} \quad \cdots\cdots(14)$$

このようにして，そのデバイスのスタティック電流特性が指数関数として求めることができます．正確さには欠けますが，少し大きなマージンを取って検討することで，これらの方法でもそれなりに役立つことができると思います．

5　まとめ

スタティック電流が温度に対して指数関数的に上昇し，その値が無視できなくなると，従来とは異なる考え方が熱設計において必要になってきます．実際のスタティック電流はデバイスによってはほかのいくつかの要因で変動し，単純に一つの指数関数で表せなくなる場合があります．温度の低い領域では，よりいっそうほかの要因がスタティック電流に及ぼす影響は大きいように見えます．また，温度の高いところでは測定した電流がまだドリフトの途中で指数関数から外れるデータとなる可能性もあります．

ここで展開した考察は限定された条件をもとにしていますが，今後の熱設計の一助になれば幸いです．

ながしま・さきょう